

15 Sonnensystem

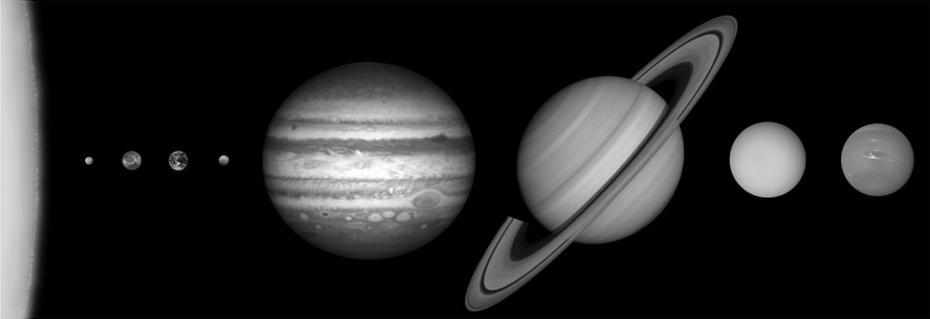
Nach diesem Crashkurs in Atom-, Kern- und Teilchenphysik haben Sie es verdient, ein wenig zu verschnaufen. Wir kehren zurück auf die Erde und schauen uns zunächst unsere nähere astronomische Umgebung an, bevor wir in die Unendlichkeiten des Universums aufbrechen. Hier werden wir nicht mit Wahrscheinlichkeiten und Unbestimmtheiten konfrontiert, die unserem Vorstellungsvermögen sehr zusetzen. Doch dafür ist nun eine andere Seite unserer Fantasie gefragt.

Wir haben es im Weltall mit ausgesprochen großen und schweren Körpern zu tun, die dazu auch noch sehr zahlreich sind. Ebenso liegen zwischen diesen Körpern meist riesige Entfernungen, die für uns nur schwer fassbar sind. Wenn wir das Licht dieser Objekte beobachten, blicken wir daher auch automatisch weit in die Vergangenheit zurück. Und auf die Beobachtung von Licht ist die Astronomie in weiten Teilen eingeschränkt. Im Gegensatz zu Atomen und Elementarteilchen kann man mit fernen Sternen oder Galaxien keine Experimente durchführen. Man kann nur den Ist-Zustand oder besser gesagt den War-Zustand aufzeichnen. Doch bevor wir uns Sternen und Galaxien zuwenden, schauen wir uns zuerst die drei Himmelskörper an, die für unser Leben am wichtigsten sind: die Erde, die Sonne und den Mond.

Unser Heimatplanet trägt und ernährt nicht nur die ganze Menschheit, sondern jegliches Leben, das wir bislang kennen. Die *Erde* hat einen Durchmesser von etwa 12 700 km und rotiert einmal am Tag um ihre Achse. Sie ist durchschnittlich 150 Millionen Kilometer von der Sonne entfernt, was einem Lichtweg von etwas mehr als 8 Minuten entspricht. Dabei bewegt sie sich auf einer leicht elliptischen, also nicht ganz kreisförmigen Bahn in einem Jahr einmal um die Sonne. Auf dieser geschlossenen Kurve ist sie immerhin mit 30 km/s unterwegs, ohne dass wir von dieser Geschwindigkeit etwas bemerken.

Die Rotationsachse der Erde ist gegenüber ihrer Bahnebene um etwa 23 Grad geneigt. Wegen der Drehimpulserhaltung zeigt diese Achse wie bei einem Kreisel stets in dieselbe Richtung. Dadurch verändert sich der Auftreffwinkel des Sonnenlichts im Laufe eines Jahres beträchtlich und damit die Energie, die die Erdoberfläche erhält. Durch diesen Zyklus entstehen unsere wiederkehrenden Jahreszeiten.

Wenn wir die Erde vom Weltraum her betrachten, sieht sie aus wie eine blaue Perle. Sie besitzt eine bemerkenswert große Menge an Wasser, das mehr als 70% der gesamten Oberfläche mit einer durchschnittlichen Tiefe von mehr als 3,5 km bedeckt. Dieses Wasser macht die Erde, zumindest in unserem Sonnensystem, zu



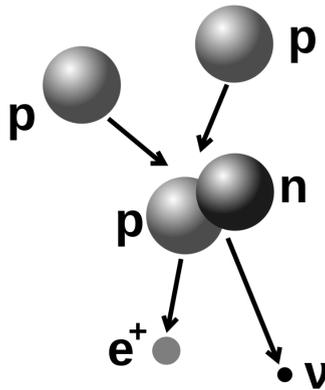
27 Die Planeten des Sonnensystems (von links nach rechts): Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun. Ganz links: der Rand der Sonnenscheibe

einem ganz besonderen Planeten. Es ist nahezu allgegenwärtig, ob in den Ozeanen, im Eis der Arktis, in Gletschern, in Flüssen, Bächen und Seen oder in Form von Wolken am Himmel. Ohne dieses vielseitige Lösungsmittel ist für uns irgendeine Art von Leben kaum vorstellbar.

Die Atmosphäre der Erde besteht zu 78% aus Stickstoff, zu 21% aus Sauerstoff und zu knapp 1% aus dem Edelgas Argon. Der nächst häufige Bestandteil ist Kohlendioxid mit nur 0,04%, gefolgt von vielen anderen Gasen in wesentlich niedrigeren Konzentrationen.

Das Kohlendioxid ist zusammen mit Methan und Ozon für den natürlichen Treibhauseffekt der Erde verantwortlich. Diese Gase schränken die Durchlässigkeit der Atmosphäre für Wärmestrahlung ein. Daher kann die Infrarotstrahlung, die durch die Erwärmung des Bodens und des Wassers entsteht, die Erde nur schwer wieder verlassen. Die Treibhausgase bilden sozusagen eine Isolierdecke, die unseren Planeten um immerhin 33 Grad aufheizt. Ohne sie wäre es auf der Erde nicht durchschnittlich 15 Grad Celsius warm, sondern gerade einmal -18 Grad Celsius kalt. Die Temperatur der Erde *ohne* den natürlichen Treibhauseffekt entspräche der eines Gefrierschranks. In nur 200 Jahren hat der Mensch mit seiner Industrialisierung allerdings den Anteil des Kohlendioxids um mehr als 35% erhöht. Ich kann mir daher nur schwer vorstellen, dass dies ohne langfristige und schwerwiegende Folgen bleiben wird.

Die *Sonne* ist der mit Abstand größte und schwerste Körper in unserer kosmischen Nachbarschaft. Sie hat einen Durchmesser von 1,4 Millionen Kilometern, was dreieinhalb Mal so viel ist wie der Abstand zwischen Erde und Mond. Zudem vereinigt sie fast 99,9% der Masse des gesamten Sonnensystems. Ihr riesiger Gasball besteht zu fast drei Vierteln aus Wasserstoff und zu einem Viertel aus Helium. Nur ein Prozent ihrer Masse entfällt auf schwerere Elemente.



28 Verschmelzung zweier Protonen zu einem Deuteriumkern (schwerer Wasserstoff) und einem Positron (e^+ = Anti-Elektron) und Neutrino (ν)

Im Inneren der Sonne verschmelzen die Kerne von Wasserstoff bei einer Temperatur von 15 Millionen Grad zu Helium. Trotzdem sind selbst diese hohen Temperaturen klassisch betrachtet noch viel zu gering für eine Kernverschmelzung. Die Teilchengeschwindigkeiten, die mit diesen Temperaturen einhergehen, reichen nicht aus, dass die Protonen ihre gegenseitige elektrische Abstoßung überwinden können. Ihr Abstand ist bei einem Stoß nämlich nicht gering genug, sodass sie die Anziehung der starken Wechselwirkung genügend spüren könnten. Sie müssten daher in allen Fällen wieder auseinanderfliegen, ohne die Möglichkeit zu haben, sich miteinander zu verbinden. Die tatsächliche Verschmelzung der Protonen gelingt nur wegen eines quantentheoretischen Effekts, wegen des Tunneleffekts.

Kommen sich zwei Protonen wie in der Sonne genügend nahe, so gibt es nach der Quantentheorie auch eine winzige Chance, dass sie urplötzlich als ein gebundenes System vorliegen. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit, dass sie sich spontan innerhalb eines Bindungszustands wiederfinden, ist zwar sehr gering, aber nicht null. Tatsächlich ist sie gerade ausreichend für die Kernfusionprozesse in der Sonne. Von außen betrachtet, sieht es so aus, als hätten die Protonen bei ihrem Zusammenstoß eine abstoßende elektrische Energiemauer durchtunnelt und sich innerhalb dieser Mauer miteinander verbunden. Unmittelbar nach diesem Prozess wandelt sich dann eines der Protonen in ein Neutron um, wobei auch ein Positron (Anti-Elektron) und ein Neutrino abgestrahlt werden. Bis zum Helium, dem eigentlichen Endprodukt der Verschmelzungskette in der Sonne, sind allerdings noch zwei weitere Reaktionsschritte notwendig.

Dieser Kernfusionsofen mit seiner Massenumwandlung ist die Energiequelle der Sonne. In ihm besitzen die Atome keine Elektronen mehr. Vielmehr bewegen sich Atomkerne und Elektronen in diesem heißen sogenannten Plasma frei umher.

Dabei ist die Materie so dicht gepackt, dass sich die Energie, die bei der Verschmelzung in Form von Gammastrahlung frei wird, wie durch eine dichte Suppe hindurcharbeiten muss. Auf ihrem ungeplanten Weg zur Sonnenoberfläche benötigen diese Photonen daher bis zu 100 000 Jahre, wobei sie wieder und wieder abgelenkt werden. Sie verlieren hierbei so viel Energie, dass sie uns schließlich als sichtbares Licht erreichen. Nur die Neutrinos der Verschmelzungsreaktionen können das Sonneninnere nahezu ungehindert verlassen. Sie sind so zahlreich, dass ein Mensch auf der Erde pro Sekunde von durchschnittlich 10^{14} Neutrinos regelrecht durchsiebt wird, ohne dass auch nur eines davon eine Kernreaktion in unserem Körper auslöst.

Die brodelnde Oberfläche der Sonne ist mit 5500 Grad Celsius wesentlich kühler als das Sonneninnere. Hier wird das gesamte sichtbare Licht in den Weltraum abgestrahlt. Darüber befindet sich noch eine sehr dünne, aber heiße Gashölle, die man nur bei Sonnenfinsternissen sehen kann. Diese Korona ist der Startpunkt für den Sonnenwind, einen Strom von schnellen Elektronen und leichten Atomkernen. Er verursacht die wunderschönen Kometenschweife und Polarlichter. Die Letzteren entstehen immer dann, wenn die Teilchen des Sonnenwinds vom Erdmagnetfeld eingefangen werden und entlang der Feldlinien zu den Magnetpolen geleitet werden. Hier treffen sie auf die äußersten Schichten der Erdatmosphäre und regen die Luftmoleküle durch Stöße zum Leuchten an.

Der *Mond* ist mit einem Durchmesser von knapp 3500 km etwa dreieinhalb Mal kleiner und 80-mal leichter als die Erde. Dies führt lediglich zu einem Sechstel der irdischen Schwerkraft, weswegen die Astronauten auf dem Mond die bekannten lustigen Hüpfbewegungen vollführten. Trotzdem ist unser Mond im Vergleich zu seinem Planeten, der Erde, viel größer und schwerer als alle anderen Monde des Sonnensystems. Diese große Masse bewirkt eine effektive Stabilisierung der Erdachse, die sich sonst langsam in die Bahnebene der Erde hineindreihen würde. Ohne den Mond hätten wir daher extreme Jahreszeiten mit abwechselnd einem halben Jahr Polarnacht und ständigem Sonnenschein.

Der Mond wendet uns stets dieselbe Seite zu, weil er synchron, oder wie man auch sagt, gebunden rotiert. Er dreht sich während seines Umlaufs um die Erde innerhalb von 27 Tagen auch genau einmal um sich selbst. Bei seiner Entstehung während der Frühphase unseres Sonnensystems war er aber ein schnell rotierender Himmelskörper, der einen wesentlich geringeren Abstand zur Erde hatte. Man geht heute davon aus, dass der Mond durch eine Kollision zwischen der Erde und einem etwas kleineren Planeten entstanden ist. Bei diesem Zusammenstoß wurde eine große Menge Planetenmaterial in den Weltraum geschleudert, welches sich in der Erdumlaufbahn sammelte und innerhalb von vielleicht 10 000 Jahren den Mond formte. Dabei war der Aufprall der beiden Planeten ein relativ unwahrscheinliches Ereignis, denn er erfolgte mit einer geringen Geschwindigkeit und unter einen fla-

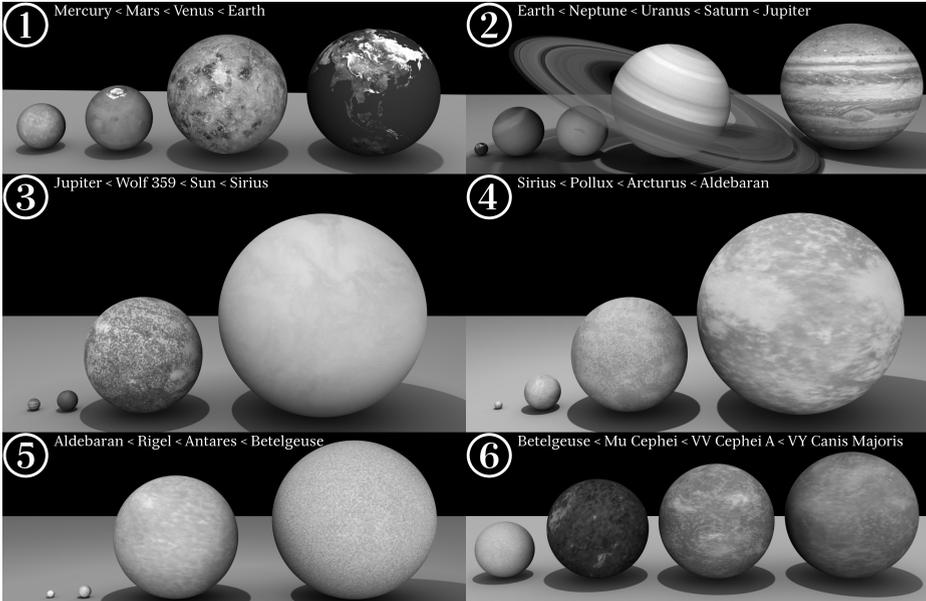
chen Winkel. Wären die Erde und dieser Himmelskörper dagegen anders zusammengestoßen, so wäre die Erde wahrscheinlich mondlos geblieben.

Der Mond als Verursacher von Ebbe und Flut diktiert den Tagesablauf vieler Küstenbewohner und Meerestiere. Seine Schwerkraft ist auf der ihm zu- und abgewandten Seite der Erde wegen des unterschiedlichen Abstands verschieden groß. Deswegen beulen sich unsere Ozeane aus, während die Erde zusammen mit diesen Flutbergen rotiert. Aber nicht nur der Meeresspiegel steigt dabei an, sondern auch das Land wird zweimal am Tag um bis zu einem halben Meter angehoben. Diese ständigen Knetaktionen kosten eine ganze Menge Energie. Aber woher stammt diese Energie eigentlich?

Wie wir aus dem Energieerhaltungssatz wissen, muss sie einem anderen Teil des Systems Erde-Mond entzogen werden, da Energie weder entstehen noch verschwinden kann. Und tatsächlich wird die Drehung der Erde von den Gezeitenkräften messbar verlangsamt. Daher verlängert sich ein Erdentag innerhalb von 60 000 Jahren um eine Sekunde. Doch dies sind noch nicht alle Auswirkungen dieser Abbremsung. Wegen der geringeren Rotationsenergie muss sich auch die Mondbahn anpassen, was dazu führt, dass sich der Mond alle 25 Jahre um einen Meter weiter von der Erde entfernt. Dies wird seit den Apollo-Flügen regelmäßig gemessen. Dazu wird ein Laserstrahl auf einen Reflektor gerichtet, den die Astronauten auf der Mondoberfläche zurückgelassen haben. Aus der Laufzeit des gepulsten Lichts wird schließlich die Entfernung zum Mond zentimetergenau bestimmt. Aber es gibt noch einen Effekt, der durch die Gezeitenreibung verursacht wurde: Sie bremste auch die Drehung des Mondes im Laufe von Jahrmilliarden so stark ab, dass wir schließlich nur noch eine Seite von ihm zu Gesicht bekommen.

Der Mond besitzt keinerlei Atmosphäre, was zusammen mit den langen Tag- und Nachtzeiten von jeweils etwa zwei Wochen zu erheblichen Temperaturschwankungen führt. Es ist dort daher am Tag mit 130 Grad Celsius ziemlich heiß und in der Nacht mit -160 Grad Celsius klirrend kalt. Doch trotz dieser heißen Temperaturen ist es seit 2009 sicher, dass der Mond nennenswerte Wasservorkommen besitzt. Sie befinden sich am Boden von dunklen Kratern an den Polregionen, die Milliarden Jahre lang kein Sonnenlicht gesehen haben. Dieses im Gestein eingelagerte Wasser könnte bei künftigen Mondaufenthalten zur Versorgung von Astronauten beitragen.

Im letzten Abschnitt dieses Kapitels möchte ich mit Ihnen einen Gang durch unser gesamtes Sonnensystem unternehmen. Wir werden dabei die ungeheuren Entfernungen und die relative Leere des Weltalls kennenlernen und gelangen schließlich bis zu unserem nächsten Nachbarstern. Ich möchte für diese Reise ein Modell wählen, in dem unsere Erde die Größe eines Apfels hat. In diesem Maßstab ist die Sonne genau einen Kilometer von der Erde entfernt. Sie hat einen Durchmesser von



29 Größenvergleich der Planeten des Sonnensystems (Erde in 1 = Earth) mit der Sonne (in 3 = Sun) mit anderen Sternen. Wolf 359 ist ein Roter Zwerg und ab Pollux sind alles Riesensterne (siehe nächstes Kapitel).

9 Metern, was ungefähr einem zweistöckigen Einfamilienhaus entspricht. Die Lichtgeschwindigkeit wäre in diesem Universum etwas schneller als 7 km/h und liegt damit genau zwischen dem Tempo eines schnellen Fußgängers und dem eines langsamen Joggers.

Wir beginnen unsere Reise bei unserem strahlenden Häuschen und gehen los. Nach knapp 400 m treffen wir auf den ersten Planeten von der Größe einer Erdbeere. Merkur besteht wie die Erde an der Oberfläche aus Gesteinen, verfügt aber über keine Atmosphäre. Nach etwas mehr als 700 m erreichen wir die wolkenverhüllte Venus mit derselben Größe wie die Erde. Gehen wir weiter zur Erde, so sehen wir dort den Mond in 2,5 m Abstand als Kirsche um unseren Apfel ziehen. Den letzten der sogenannten Gesteinsplaneten erreichen wir nach weiteren 500 m. Der Mars hat Pflaumengröße und ist von einer dünnen hauchartigen Atmosphäre umgeben.

Laufen wir weiter, so treffen wir erst einmal lange auf nichts weiter außer etlichen Asteroiden. Erst in mehr als 5 Kilometern Entfernung von der Sonne nähern wir uns Jupiter. Er ist im Vergleich zur Erde eine riesige Gaskugel mit 1 m Durchmesser. Zum nächsten Gasplaneten sind wir nun schon insgesamt 9,5 km unterwegs. Saturn ist mit 80 cm nur unwesentlich kleiner als Jupiter und hat damit die Ausmaße eines großen Sitzballs. Noch weiter draußen finden wir nach fast 20 bzw. 30 Kilometern mit Uranus und Neptun die beiden letzten Planeten des Sonnensystems.

Auch sie bestehen im Wesentlichen aus Gas und sind mit etwas mehr als 30 cm etwa so groß wie ein Eimer.

Zwischen 30 km und 50 km Entfernung von unserer Modellsonne stoßen wir auf fast 100 000 Asteroiden und Zwergplaneten. Sie sind nur Millimeter bis Zentimeter groß und so leuchtschwach, dass bisher nur wenige von ihnen direkt beobachtet werden konnten. Doch ab jetzt wird es im All erst richtig leer.

Unsere Einfamilienhaussonne ist ab hier bis in 100 000 km Entfernung von einer Wolke aus Kometen umgeben. Dies ist immerhin ein Viertel der echten Strecke bis zum Mond. Die Anzahl der Kometen schätzt man auf bis zu 1000 Milliarden, wobei sie in unserem Maßstab allerdings nur so groß sind wie ein ganz feines Sandkorn. Ab und zu wird eines dieser Körnchen durch die Schwerkraft aus seiner Bahn gelenkt und gelangt nach einer langen Reise ins Innere des Sonnensystems. Hier verdampft dann bei jedem Umlauf ein kleiner Teil des Kometeneisballs zu einem leuchtenden Schweif. Obwohl wir um unsere Sonne immerhin 10^{12} Kometensandkörner vermuten, so sind sie zusammengenommen doch lediglich ein Kubikmeter Sand. Und dieses bisschen Sand findet sich fein verteilt innerhalb einer Kugel von 100 000 km Durchmesser wieder.

Doch nun ziehen wir unsere Expedition auch bis zum Ende durch. Erst wenn wir in unserem Modell knapp drei Viertel der realen Entfernung von der Erde zum Mond zurückgelegt haben, treffen wir wieder auf einen Stern. Bis dorthin benötigt das Licht in Wirklichkeit etwas mehr als 4 Jahre. Hier erst steht also das nächste leuchtende Einfamilienhaus.

Dazwischen befindet sich nichts als extrem verdünntes Wasserstoffgas mit etwa einem Atom auf 4 Kubikzentimeter. Dies ist so wenig, dass man es sich kaum vorstellen kann. Aber wir versuchen es trotzdem und legen in Gedanken ein Rohr bis zum nächsten Stern. Dann schieben wir einen Kolben in das Rohr und pressen alles darin enthaltene Gas so lange zusammen, bis wir unseren gewohnten Luftdruck erhalten. Um dies zu erreichen, müssen wir den Wasserstoff, der auf immerhin 4×10^{13} km verteilt ist, bis auf einen viertel Millimeter verdichten. Erst in diesem winzigen zusammengepressten Gasscheibchen liegen dann wieder irdische Verhältnisse vor.